

DS N°6

Aucun document autorisé

Calculatrice non autorisée

Le devoir comporte un problème (temps conseillé 3h) et un exercice

Durée 4h

Problème N°1 : Goniomètre à actionneurs piézoélectriques (Mines MP 2025)

I. Présentation

1.1. La radiocristallographie

La cristallographie par rayons X ou radiocristallographie est une méthode d'analyse de la matière qui consiste à analyser la diffraction d'un faisceau lumineux (de fréquence typique de 10^{16} à 10^{19} Hz) par un échantillon cristallin. Ce procédé est très utilisé en biologie pour déterminer la structure des molécules du vivant. Dans ce cadre, un monocristal de la molécule est placé dans un faisceau de rayons X monochromatiques et la diffraction observée pour différentes positions du cristal dans le faisceau de rayons X permet de déterminer non seulement la structure du cristal, mais aussi et surtout la structure de la molécule.

1.2. Le goniomètre SmarGon

Le positionnement de l'échantillon doit être très précis : il est réalisé par un équipement appelé goniomètre et correspond à une structure robotique à 6 mobilités. Le SmarGon (de la société SmarAct GmbH), présenté sur la Figure 1 et sur la Figure 2, est un goniomètre de dernière génération qui utilise une structure mécanique mixte série-parallèle et qui permet d'atteindre des précisions inférieures à 10^{-3} degré de position angulaire et inférieure à 5 nm de position linéaire.

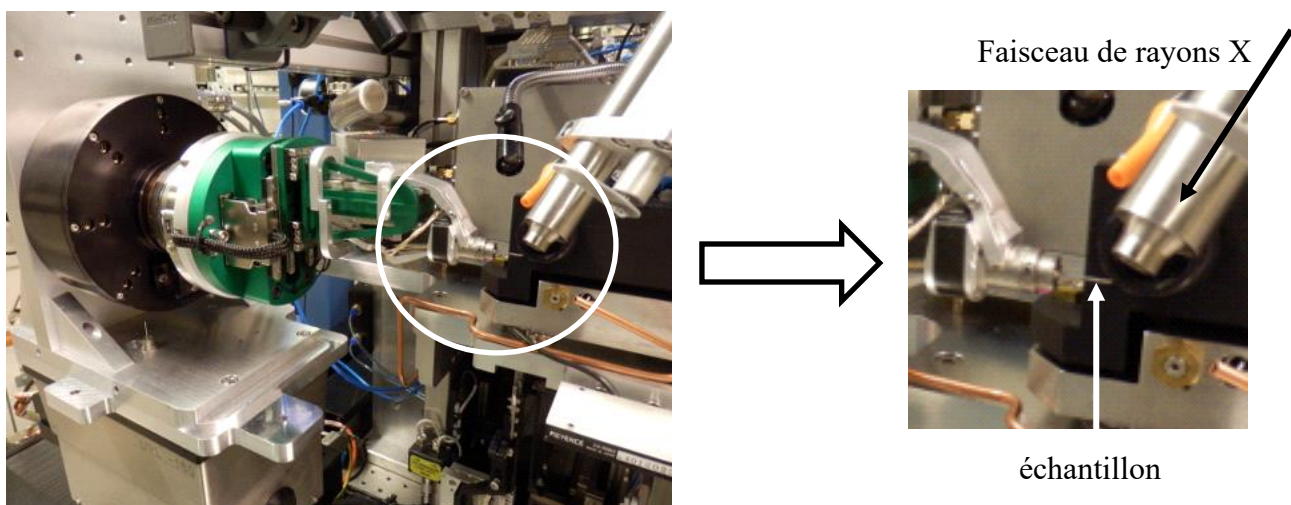


Figure 1 : photographie du goniomètre SmarGon

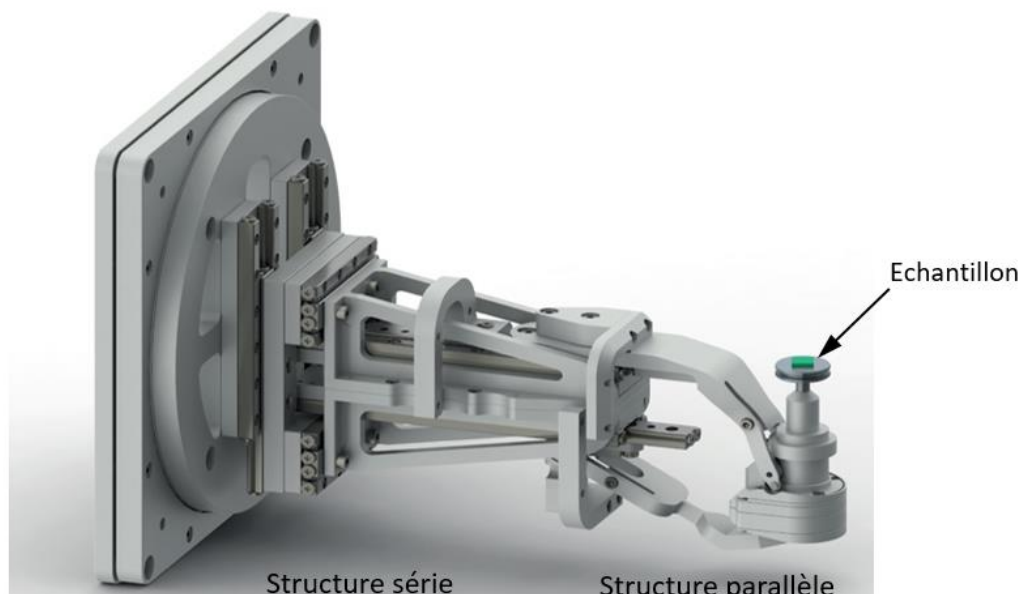


Figure 2 : modèle tridimensionnel du goniomètre SmarGon

Le goniomètre étudié (Figure 3) permet donc :

- de positionner l'échantillon au centre du faisceau de rayons X, ce qui nécessite le pilotage des 3 coordonnées cartésiennes du centre de l'échantillon : x, y et z ;
- d'orienter l'échantillon dans l'espace, ce qui nécessite le pilotage de 3 angles d'orientation : ψ, θ et φ .

Ainsi la pièce qui porte l'échantillon à étudier possède 6 degrés de liberté par rapport au bâti.

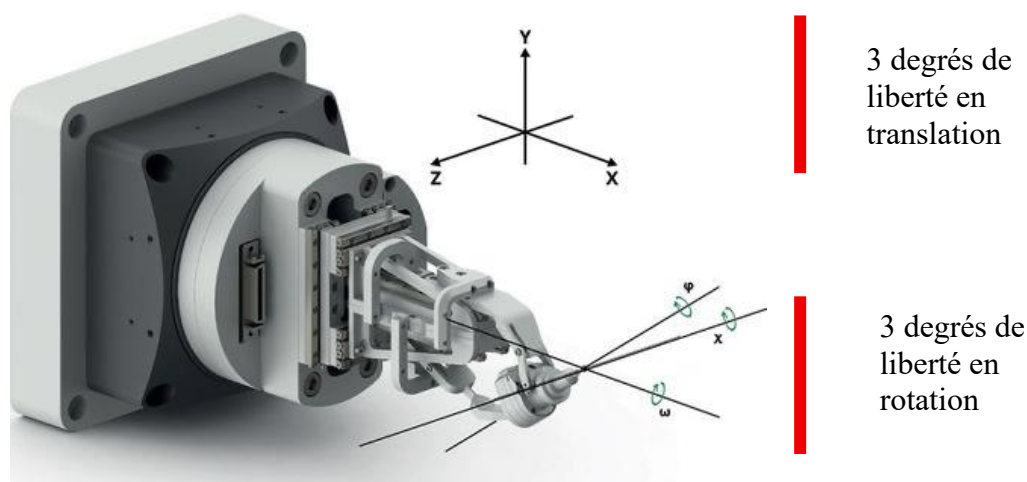


Figure 3 : les six degrés de liberté de l'échantillon du goniomètre SmarGon

La société SmarAct, concevant et produisant le SmarGon, annonce des performances de précision de positionnement très élevées. Ces performances annoncées sont rassemblées dans le diagramme des exigences représenté dans l'Annexe 1. L'enjeu de ce sujet est de vérifier certaines de ces performances, en modélisant puis simulant le goniomètre SmarGon.

2. Modélisation des chaînes fonctionnelles

L'organisation topo-fonctionnelle étant similaire sur les six axes du positionneur, on ne s'intéresse ici qu'à la chaîne de puissance à l'origine de la rotation d'angle θ .

Question 1. A l'aide du diagramme de blocs internes donné sur l'Annexe 2, compléter sur le document-réponse la chaîne de puissance du goniomètre SmarGon, relative à la rotation d'angle θ .

3. Choix des actionneurs

On cherche à sélectionner dans le catalogue du constructeur (**Annexe 3**), les actionneurs capables de vérifier les exigences 1.2.3 et 1.1 du cahier des charges.

On s'intéresse ici à la structure du goniomètre qui autorise le réglage des paramètres géométriques de l'angle d'orientation θ , et de l'abscisse x_E du centre de l'échantillon à l'aide de deux actionneurs linéaires situés au sein de deux liaisons glissière.

3.1. Choix d'un actionneur validant l'exigence 1.2.3 « Domaine atteignable »

Pour vérifier l'exigence « Domaine atteignable » (**Annexe 1**), on détermine à l'aide d'une fermeture géométrique les courses nécessaires des deux actionneurs linéaires.

Dans la position étudiée, le modèle cinématique de la structure est donné Figure 4.

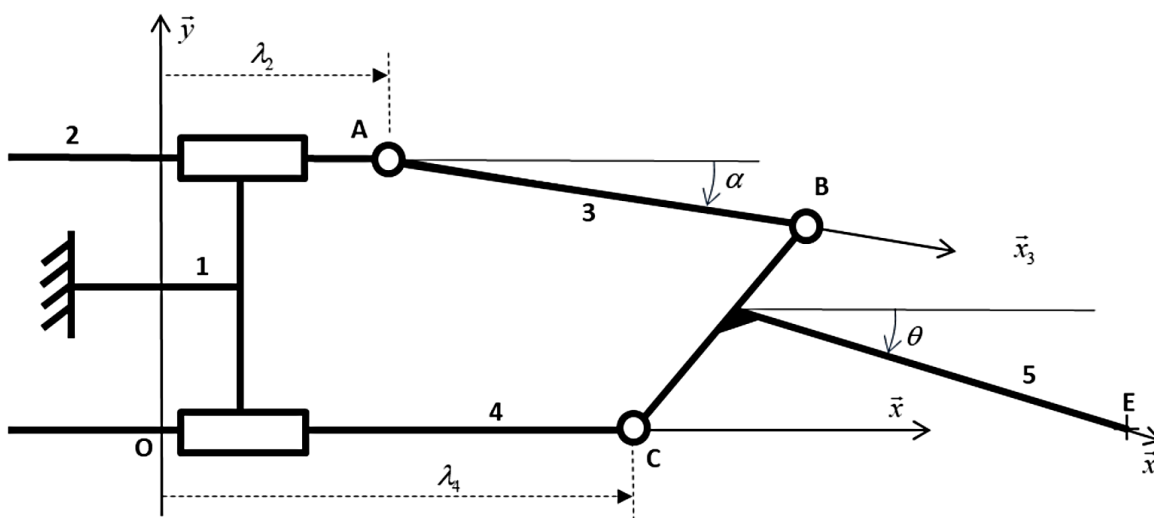


Figure 4 : Modèle cinématique plan de la structure terminale

Il est à noter que dans la position du schéma ci-dessus, les angles α et θ , sont **négatifs**.

Données géométriques :

Au bâti 1 est associé le repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ et à chaque solide i est associée une base orthonormée directe $(\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z})$. Le problème étant plan, le vecteur \vec{z} est commun à toutes les bases.

$\lambda_2(t)$ et $\lambda_4(t)$ sont les paramètres de position imposés par les deux actionneurs linéaires piézoélectriques.

On note :

$$\overrightarrow{OC} = \lambda_4(t) \vec{x} \quad \overrightarrow{AB} = l_3 \vec{x}_3 \quad \overrightarrow{OE} \cdot \vec{x} = x_E(t) \quad \overrightarrow{OA} = \lambda_2(t) \vec{x} + e \vec{y}$$

$$\overrightarrow{CB} = b \vec{x}_5 + c \vec{y}_5 \quad \alpha(t) = (\vec{x}, \vec{x}_3) = (\vec{y}, \vec{y}_3) \quad \text{et} \quad \theta(t) = (\vec{x}, \vec{x}_5) = (\vec{y}, \vec{y}_5)$$

Les deux paramètres utiles au positionnement de l'échantillon sont $\theta(t)$ et $x_E(t)$.

A partir de la position de la Figure 4, on considère deux mouvements simples distincts :

- mouvement 1 : $\theta(t)$ est constant et $x_E(t)$ est croissant ;
- mouvement 2 : $x_E(t)$ est constant et $\theta(t)$ est croissant.

Question 2. Pour chacun des « mouvement 1 » et « mouvement 2 » indiquer les déplacements nécessaires des actionneurs linéaires. Compléter le tableau du document-réponse en entourant les bonnes réponses.

On note $\Delta\lambda = \lambda_4(t) - \lambda_2(t)$.

Question 3. A partir d'une fermeture géométrique, déterminer une équation du second degré de la forme : $\Delta\lambda^2 + A_1(\theta)\Delta\lambda + B_1(\theta) = 0$ où $A_1(\theta)$ et $B_1(\theta)$ sont deux fonctions de θ à expliciter.

Grâce à une simulation, on obtient la courbe de la Figure 5.

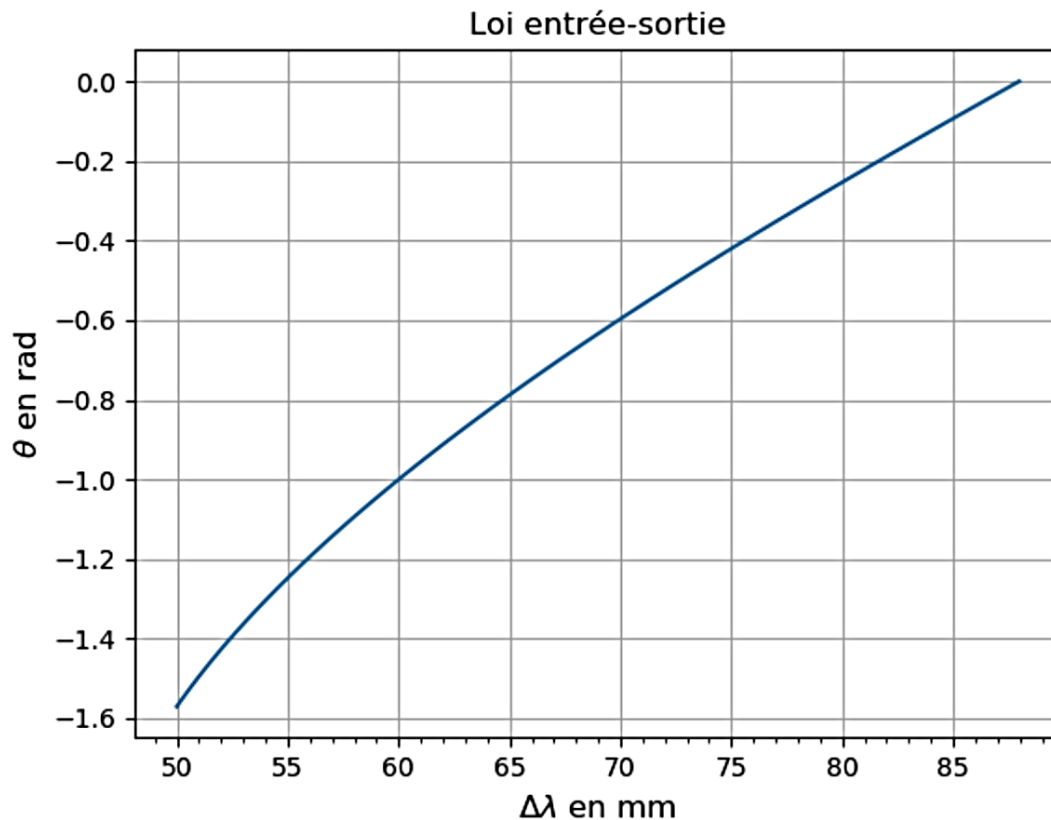


Figure 5 : loi entrée-sortie simulée du paramètre θ en fonction de $\Delta\lambda$

Question 4. A partir des caractéristiques d'actionneurs données en **Annexe 3**, justifier que seul l'actionneur de référence CLS 92 permet de valider à la fois la plage de variation de x_E et celle de θ , de l'exigence 1.2.3 ?

3.2. Choix d'un actionneur validant l'exigence 1.1 « Maintenir en position »

Pour vérifier l'exigence « Maintenir en position » (**Annexe 1**), on détermine à l'aide d'une étude statique la force à fournir par l'actionneur linéaire le plus sollicité.

Hypothèses :

- les liaisons sont supposées parfaites ;
- le repère lié au bâti 1 est considéré comme galiléen, l'ensemble du mécanisme est **en équilibre** dans ce repère, dans la position représentée Figure 4 ;
- le problème est plan dans (O, \vec{x}, \vec{y}) ;
- le poids des pièces est négligé, sauf celui du solide 5 auquel est fixé un actionneur d'orientation autour de l'axe (E, \vec{y}_5) . Ce poids exerce une action mécanique sur la pièce 5 modélisée par : $\{T_{pes \rightarrow 5}\} = \left\{ \begin{matrix} -P\vec{y} \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_{G_5}$ avec $P > 0$ et

$$\overrightarrow{CG_5} = d \vec{x}_5 + \frac{c}{2} \vec{y}_5 \text{ où } G_5 \text{ est le centre de gravité de la pièce 5.}$$

Question 5. Montrer que la résultante des actions mécaniques de 5 sur 3, notée $\vec{R}_{5 \rightarrow 3}$, a pour direction le vecteur \vec{x}_3 .

On notera alors $\vec{R}_{5 \rightarrow 3} = X_{53} \vec{x}_3$.

Question 6. Isoler 5, déterminer X_{53} en fonction de P et des grandeurs géométriques nécessaires. Préciser l'équation scalaire utilisée, issue du principe fondamental de la statique.

Le torseur $\{T_{act \rightarrow 2}\}$ modélisant l'action mécanique de l'actionneur linéaire sur 2 a pour résultante $\vec{R}_{act \rightarrow 2} = F \vec{x}$

Question 7. Isoler $\{2+3\}$ et déterminer F en l'exprimant sous la forme $F = P \frac{(A_2 \cos \theta + B_2 \sin \theta)}{b \sin(\theta - \alpha) + c \cos(\theta - \alpha)} \cdot \cos \alpha$
Où A_2 et B_2 sont des constantes à déterminer. Préciser l'équation scalaire utilisée, issue du principe fondamental de la statique.

Par simulation, on peut calculer les valeurs de R et on obtient la courbe de la Figure 6 ci-après :

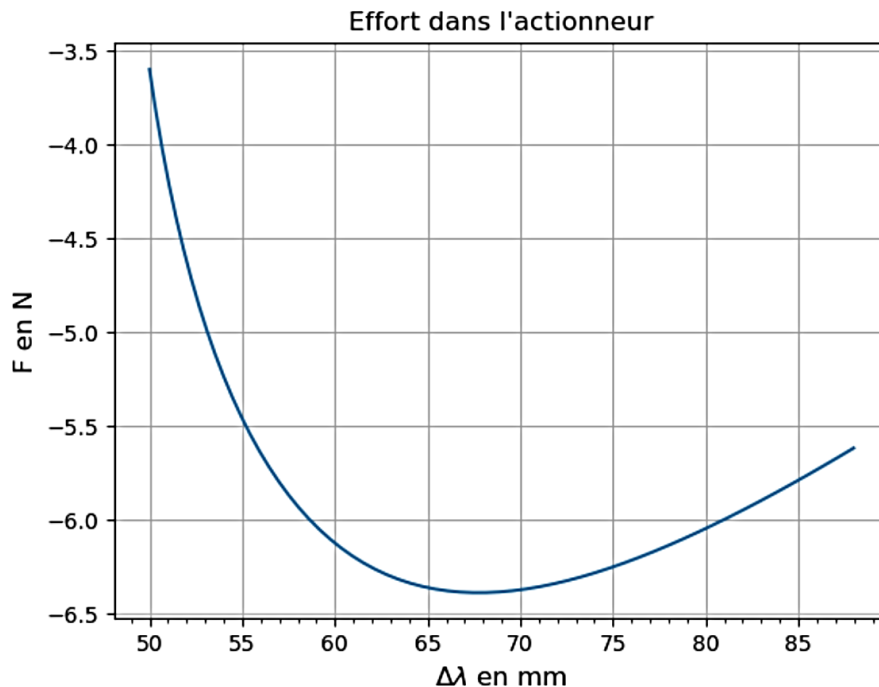


Figure 6 : effort dans l'actionneur F simulé en fonction de $\Delta\lambda$

Question 8. A partir des références d'actionneurs données en **Annexe 3**, déterminer le ou les actionneurs permettant de vérifier la force à exercer (exigence 1.1). Conclure sur le choix de l'actionneur permettant le respect des exigences étudiées.

4. Validation des exigences de stabilité et de précision

4.1. Vérification de l'exigence de stabilité

L'objectif de cette sous-partie est de vérifier l'exigence 1.2.4 (**Annexe 1**) de stabilité de l'actionneur en élaborant un modèle de connaissance linéaire.

L'actionneur installé sur le goniomètre SmarGon est un actionneur linéaire piézoélectrique. Cette technologie est utilisée afin d'avoir le niveau de précision souhaité. L'actionneur linéaire utilisé dans le SmarGon est un actionneur pas-à-pas.

Chaque pas de déplacement est créé en utilisant le principe inverse de l'effet piézoélectrique. Pour cela, le matériau utilisé dans la conception de l'actionneur est une céramique, constituée en multi-couches. Ces couches sont polarisées et recouvertes d'électrodes afin de pouvoir appliquer un champ électrique d'excitation. Sous l'effet de ce champ, le matériau piézoélectrique répond par une déformation qu'il faut ensuite utiliser pour créer un petit déplacement, appelé pas. Le modèle électro-mécanique proposé pour cette étude est représenté sur la Figure 7. On notera que dans cette modélisation, la force extérieure due aux poids des différentes pièces du mécanisme de la structure terminale n'est pas prise en compte, car influant peu le comportement dynamique étudié ici. Le paramètre $\lambda(t)$ représente le déplacement d'un actionneur piézoélectrique, noté $\lambda_2(t)$ et $\lambda_4(t)$ dans les parties précédentes du sujet.

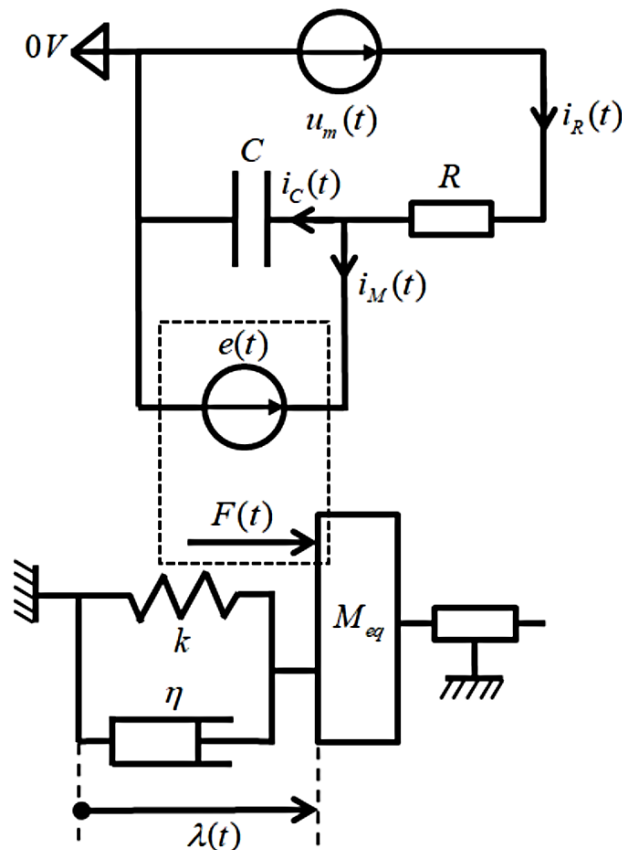


Figure 7 : modèle électro-mécanique de l'actionneur linéaire piézoélectrique

Nous adopterons, pour la conversion électro-mécanique associée à l'effet piézoélectrique du matériau, le modèle de connaissance régi par les deux équations suivantes :

$$i_M(t) = k_i \frac{d\lambda}{dt}(t) \quad \text{et} \quad F(t) = k_i e(t)$$

k_i est appelée la constante de force de l'actionneur et dépend des composites utilisés ainsi que de la géométrie des actionneurs ($k_i = 4 \text{ NV}^{-1}$).

La partie basse du modèle (Figure 7) représente un système masse, ressort, amortisseur modélisant la chaîne de transmission de puissance du SmarGon. Les paramètres k et η caractérisent respectivement la raideur et l'amortissement du corps piézoélectrique. $F(t)$ représente la force exercée par l'actionneur linéaire sur la masse équivalente M_{eq} . Nous supposons qu'à l'instant initial, toutes les grandeurs temporelles sont nulles.

Question 9. Déterminer une équation différentielle reliant $F(t)$ et ses dérivées successives à $u_m(t)$ et $\frac{d\lambda}{dt}(t)$ de la forme : $u_m(t) = a_0 F(t) + a_1 \frac{dF}{dt}(t) + a_2 \frac{d\lambda}{dt}(t)$. Vous indiquerez les expressions des constantes a_0 , a_1 et a_2 .

Question 10. Compléter le schéma-blocs du document-réponse en indiquant les fonctions de transfert (utiliser les constantes a_i) des blocs 1 et 2.

$F(t)$ représente la force exercée par l'actionneur linéaire sur la masse équivalente M_{eq} , provoquant ainsi un pas de déplacement. Les efforts développés par le ressort et l'amortisseur sur la masse équivalente, $F_r(t)$ et $F_a(t)$, obéissent aux lois de comportement suivantes :

$$F_r(t) = -k \lambda(t) \quad F_a(t) = -\eta \frac{d\lambda}{dt}(t)$$

L'actionneur linéaire étant utilisé horizontalement, nous négligerons l'impact de la pesanteur.

Question 11. Déterminer, en appliquant le théorème de la résultante dynamique à la masse équivalente M_{eq} , l'équation différentielle du mouvement de la masse équivalente reliant $\lambda(t)$ et ses dérivées successives à $F(t)$. On supposera la liaison glissière du schéma figure 7 sans frottement.

On note : $V(p) = p\lambda(p)$.

Question 12. Compléter le schéma-blocs du document-réponse en indiquant les fonctions de transfert des blocs 4 et 5. Préciser sur copie ce que représente $V(p)$.

Question 13. Déterminer l'expression sous forme canonique de la fonction de transfert $H(p) = \frac{\lambda(p)}{U_m(p)}$ du modèle ainsi obtenu.

Une étude numérique a permis d'obtenir les pôles de la fonction de transfert $H(p)$ représentés dans le plan complexe sur la Figure 8 ci-dessous :

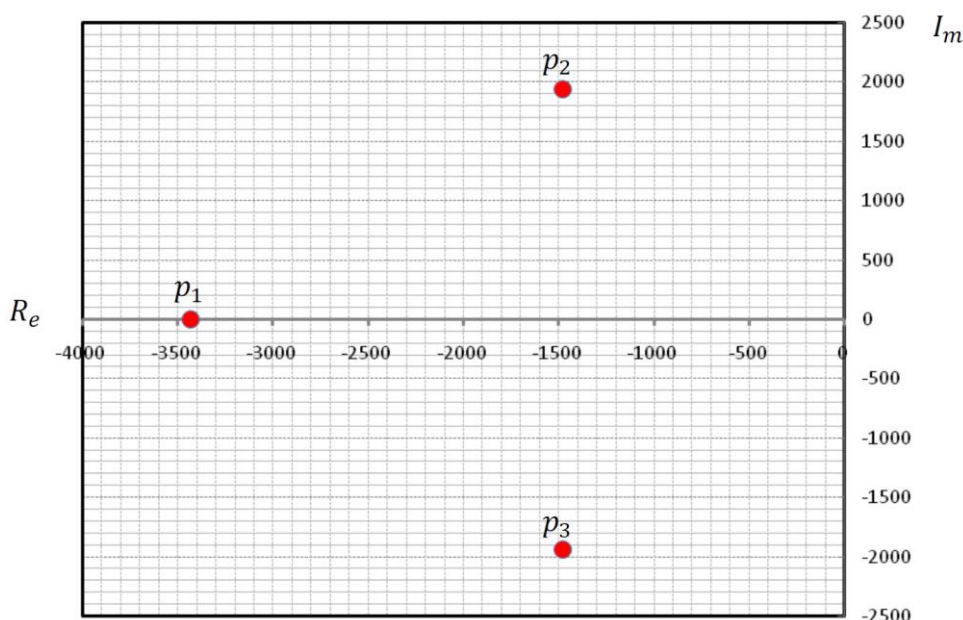


Figure 8 : pôles de la fonction de transfert $H(p)$ dans le plan complexe

Question 14. Donner les valeurs des pôles p_i de la fonction de transfert $H(p)$. Conclure sur la validité de l'exigence 1.2.4 de l'actionneur piézoélectrique. Justifier.

Conclusion : nous avons vérifié la stabilité de l'actionneur électrique à l'aide du modèle linéaire. Nous pouvons désormais vérifier ses performances en précision et rapidité.

4.2. Vérification de l'exigence 1.2.1 a, du cahier des charges

L'objectif de cette sous-partie est de vérifier l'exigence 1.2.1 a, du cahier des charges (**Annexe 1**). Lors du mode « scan », le pas de déplacement doit être inférieur ou égal à $3\mu\text{m}$.

Le goniomètre doit permettre de placer très finement l'échantillon pour analyse. La précision de positionnement lors de ce mode de déplacement très précis, appelé mode « scan », doit être inférieure ou égale à $3\mu\text{m}$. Afin de valider en avant-projet le choix de l'actionneur piézoélectrique, nous soumettons celui-ci à un échelon de tension tel que $u_m(t) = U_0 u(t)$ avec $U_0 = 10\text{ V}$, $u(t)$ représentant la fonction échelon unitaire (fonction d'Heavyside). Les valeurs numériques de k et k_i sont : $k = 16\text{ N }\mu\text{m}^{-1}$ et $k_i = 4\text{ N V}^{-1}$.

Question 15. Montrer que l'on peut écrire la fonction de transfert $H(p)$ sous la forme canonique suivante :

$$H(p) = \frac{\lambda(p)}{U_m(p)} = \frac{H_0}{(1+\tau p)\left(1+\frac{2\xi}{\omega_0}p+\frac{1}{\omega_0^2}p^2\right)}. \text{ Indiquer les expressions littérales des paramètres}$$

caractéristiques τ , ξ et ω_0 en fonction des pôles p_i .

Question 16. Discuter de la possibilité de réduire l'ordre de $H(p)$.

Question 17. Déterminer l'expression littérale de la valeur finale du déplacement $\lambda(t)$ notée λ_{fin} .

Question 18. Faire l'application numérique et conclure sur la capacité de l'actionneur à respecter l'exigence 1.2.1 a du cahier des charges.

Conclusion : nous avons vérifié la précision de positionnement en mode de déplacement fin. Nous pouvons désormais valider le mode de déplacement rapide : le mode d'approche.

4.3. Vérification de l'exigence 1.2.2 d, du cahier des charges

L'objectif de cette partie est de valider l'exigence 1.2.2 d, du cahier des charges (Annexe 1). Cette exigence s'applique au mode d'approche en déplacement rapide.

Le fonctionnement du mode d'approche est basé sur le phénomène « adhérence-glissement » (« stick-slip » en anglais). Ainsi, lorsque la variation de vitesse de l'actionneur linéaire est faible, il va entraîner un coulisseau en translation par adhérence. Au contraire, lorsque la variation de vitesse est élevée (dans un sens ou l'autre), il n'entraînera plus le coulisseau, glissant sur ce dernier. Ce principe est illustré sur la Figure 9 ci-dessous.

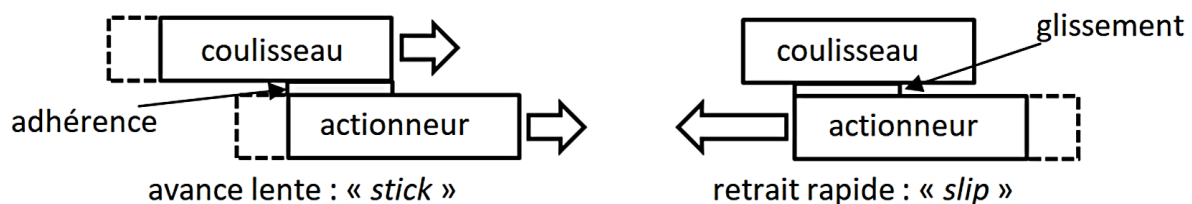


Figure 9 : phénomène de « stick-slip »

Le déplacement continu du coulisseau est obtenu par une succession rapide de la séquence suivante : un mouvement d'avance lent de l'actionneur puis un mouvement rapide de retrait pour assurer une phase de glissement : le « slip ».

Afin de réaliser une succession de pas de déplacement, nous souhaitons solliciter l'actionneur linéaire avec une tension périodique $u_m(t)$ de fréquence $f = \frac{\omega}{2\pi}$ et d'amplitude $U_0 = 10\text{ V}$ telle que représentée sur la Figure 10.

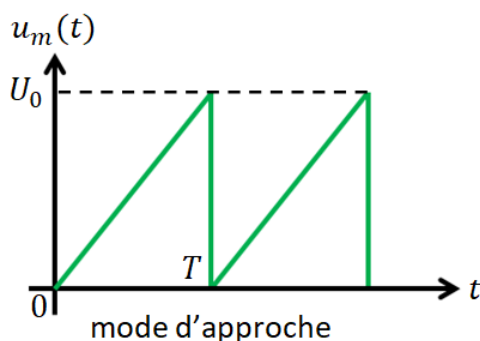


Figure 10 : pilotage de l'actionneur en mode d'approche

La fréquence de pilotage a un rôle important afin d'assurer un déplacement rapide, c'est-à-dire pour obtenir une vitesse de déplacement élevée. Pour cette raison, le pilotage de l'actionneur est choisi à très hautes fréquences : $\omega > 10^4\text{ rad s}^{-1}$ sans sortir de la bande passante de l'actionneur. L'objectif de cette partie est d'analyser le comportement fréquentiel de l'actionneur piézo-électrique afin de vérifier l'exigence 1.2.2 d.

Pour la suite du sujet, nous considérerons les valeurs numériques suivantes pour les paramètres caractéristiques de $H(p)$: $H_0 = 0,3\ \mu\text{m V}^{-1}$; $\tau = 0,3\text{ ms}$; $\xi = 0,08$; $\omega_0 = 20000\text{ rad s}^{-1}$

Question 19. Compléter le document-réponse en représentant les diagrammes asymptotiques de Bode de gain et de phase de la fonction de transfert $H(p)$. Indiquer les valeurs asymptotiques, les valeurs des pentes ainsi que les valeurs des pulsations particulières.

Une étude numérique a permis de tracer le diagramme de Bode du gain de $H(p)$, représenté sur la Figure 11, pour $\omega \in [10000\text{ rad s}^{-1}; 22000\text{ rad s}^{-1}]$.

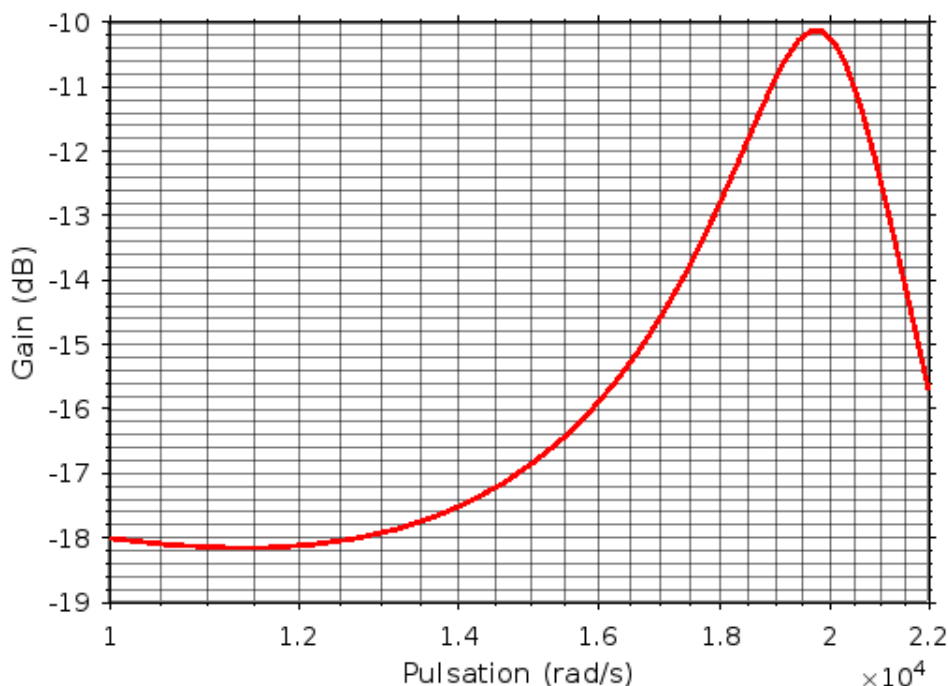


Figure 11 : diagramme de Bode du gain de $H(p)$

Question 20. Indiquer la valeur de la pulsation de résonance ω_R . Déterminer l'amplitude du déplacement $\lambda(t)$ en régime permanent pour la pulsation de résonance ω_R . On donne $\sqrt{10} \approx 3$.

Question 21. Par quel facteur le déplacement est-il multiplié en sollicitant l'actionneur piézoélectrique à la pulsation de résonance ω_R plutôt qu'à la pulsation de 10000 rad s^{-1} ? On donne $\sqrt[5]{100} \approx 2,5$.

Question 22. Conclure sur la validité de l'exigence 1.2.2 d du cahier des charges.

Conclusion : nous avons obtenu une sensibilité maximale en pilotant les actionneurs à leur résonance en mode d'approche, nous pouvons maintenant étudier les performances dynamiques du mode d'approche.

4.4. Vérification de l'exigence 1.2.2 b du cahier des charges

L'objectif de cette partie est de valider l'exigence 1.2.2 b du cahier des charges (**Annexe 1**). Cette exigence quantifie les performances dynamiques du mode de déplacement rapide.

Le modèle mécanique pour l'étude du mode d'approche et du phénomène « *stick-slip* » est représenté sur la Figure 12. Le coulisseau 2 est en liaison sphère-plan avec la partie mobile 1 de l'actionneur linéaire (appelée « translator ») aux points A et B. Ces deux liaisons sont modélisées avec frottement.

L'effet piézoélectrique développe un effort sur le translator 1 représenté par un glisseur en C porté par \vec{x} , d'intensité F_m ; $\vec{F}_m = F_m \vec{x}$. Les effets dynamiques sont pris en compte dans les questions suivantes. Le déplacement du coulisseau 2 par rapport au bâti 0 est représenté par la variable $x(t)$ telle que : $\vec{OG}_2 \cdot \vec{x} = x(t)$. Le déplacement du translator 1 par rapport au bâti est noté $\lambda(t)$ tel que $\vec{OC} = \lambda(t) \vec{x}$. Les masses du coulisseau 2 et du translator 1 sont notées respectivement m_2 et m_1 .

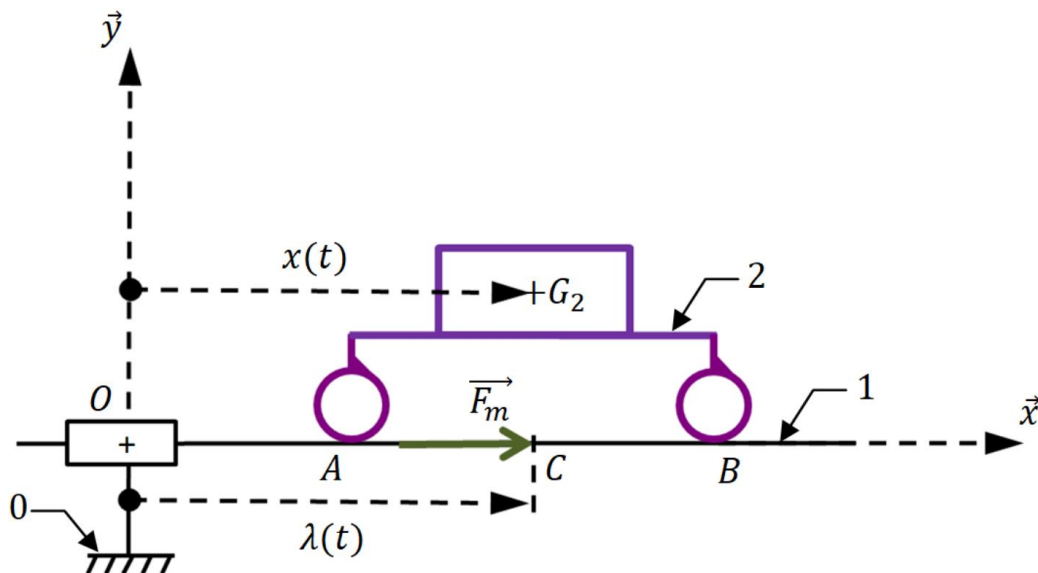


Figure 12 : modélisation du contact actionneur-coulisseau

Données et hypothèses :

- le repère lié au bâti 0 est supposé galiléen ;
- le modèle adopté pour le frottement en A et en B est le modèle de Coulomb, le facteur de frottement est noté μ_a
- l'accélération de la pesanteur est noté : $\vec{g} = -g \vec{y}$ avec $g = 10 \text{ m s}^{-2}$;
- $m_2 + m_1 = 0,4 \text{ kg}$;
- le problème est plan.

Les efforts de contact entre 2 et 1 sont représentés par les torseurs suivants, réduits respectivement en A et en B et exprimés dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\{T_{1 \rightarrow 2}^A\} = \begin{Bmatrix} X_A & 0 \\ Y_A & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_A \quad \{T_{1 \rightarrow 2}^B\} = \begin{Bmatrix} X_B & 0 \\ Y_B & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_B$$

Question 23. Isoler le coulisseau 2, effectuer le bilan des actions mécaniques qui s'y appliquent et écrire les équations issues du Théorème de la résultante dynamique, en projection suivant \vec{x} et \vec{y} .

Pour valider le cahier des charges, nous étudions le mouvement en phase de « stick », c'est-à-dire dans le cas de l'adhérence du coulisseau 2 sur le translatoreur 1 en A et en B. De plus, nous nous placerons dans le cas où $\frac{d\lambda}{dt} > 0$ et $\frac{d^2\lambda}{dt^2} > 0$ afin de modéliser un mouvement accéléré dans le sens de $+\vec{x}$.

Question 24. En prenant en compte toutes les hypothèses précédentes, déterminer l'expression de l'accélération maximale admissible $\frac{d^2x}{dt^2}_{MAX} > 0$ afin de conserver l'adhérence de 2 par rapport à 1.

Question 25. En déduire la valeur du facteur de frottement μ_a à adopter pour vérifier l'exigence 1.2.2 b du cahier des charges.

Question 26. Déterminer une équation reliant F_m , X_A , X_B et $\frac{d^2\lambda}{dt^2}$. Préciser l'isolement, le bilan des actions mécaniques extérieures ainsi que le théorème utilisé.

Question 27. Déterminer l'expression de l'effort moteur minimal F_{min} nécessaire pour obtenir le glissement de 2 par rapport à 1. Faire l'application numérique afin de vérifier l'exigence 1.2.2 c du cahier des charges.

Conclusion : nous avons validé les performances dynamiques du mode d'approche en « stick-slip ». Nous pouvons maintenant vérifier l'ensemble des exigences du cahier des charges.

5. Synthèse : validation des performances en précision et en rapidité.

L'objectif de cette synthèse est de vérifier l'ensemble des exigences du cahier des charges à l'aide de simulations numériques obtenues à partir du modèle élaboré dans les parties précédentes. Nous validerons dans cette partie les exigences 1.2.2 a, 1.2.1 b et 1.2.1 c (**Annexe 1**).

Le positionnement de l'échantillon se divise en 2 phases successives :

- un mode de déplacement rapide, ou mode d'approche, qui est une succession de séquences « stick-slip » ;
- un mode « scan » afin de positionner précisément l'échantillon.

Première phase : mode d'approche

L'actionneur linéaire piézoélectrique doit être piloté de façon à assurer le mouvement d'approche et donc la succession des modes « stick » et « slip ». Une simulation numérique, Figure 13, permet d'obtenir l'évolution temporelle de la position $\theta(t)$, de l'organe terminal de positionnement, ainsi que sa vitesse de rotation $\frac{d\theta(t)}{dt}$.

Cette simulation prend en compte le gain de la chaîne cinématique (loi entrée/sortie géométrique linéarisée partie 3.1) : $K_C = \frac{\theta(t)}{\Delta\lambda}$.

La commande est ici une tension périodique $u_m(t)$ de fréquence $f = \frac{\omega_R}{2\pi}$ et d'amplitude $U_0 = 10 \text{ V}$ telle que représentée sur la Figure 10.

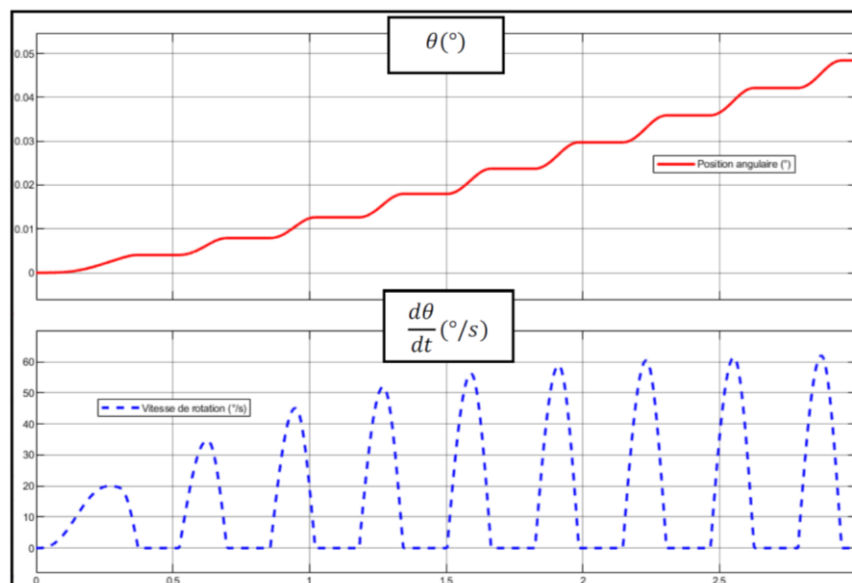


Figure 13 : position et vitesse de l'organe terminal en mode « approche » en fonction du temps (ms)

Question 28. Indiquer sur le document-réponse les phases de « stick » et « slip ».

Question 29. Vérifier l'exigence 1.2.2 a du mode d'approche du cahier des charges. Distinguer les phases transitoire et à vitesse constante.

Seconde phase : mode « scan »

L'actionneur linéaire piézoélectrique doit être piloté de façon à assurer un déplacement le plus précis possible. La Figure 14 représente les résultats d'une simulation numérique en appliquant un échelon de tension de commande de 10 V à l'actionneur linéaire. Elle indique l'évolution temporelle de la position $\theta(t)$, de l'organe terminal de positionnement. Cette simulation prend en compte le gain de la chaîne cinématique $K_c = \frac{\theta(t)}{\Delta\lambda}$.

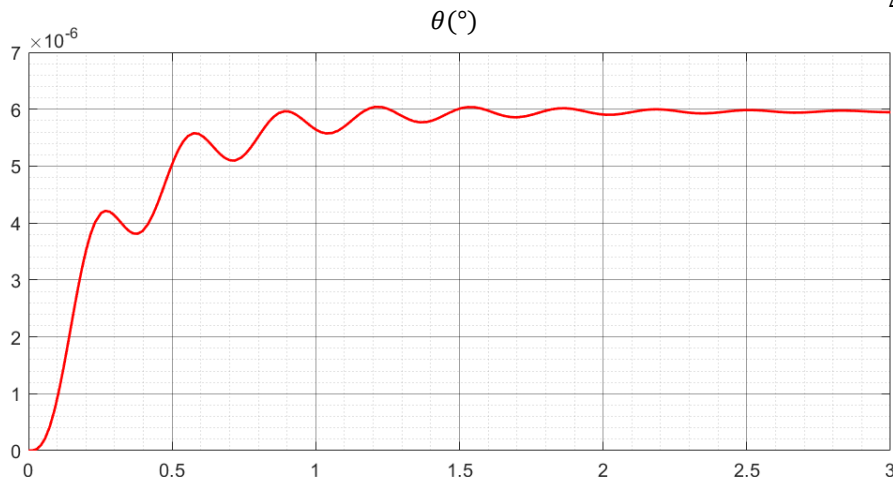


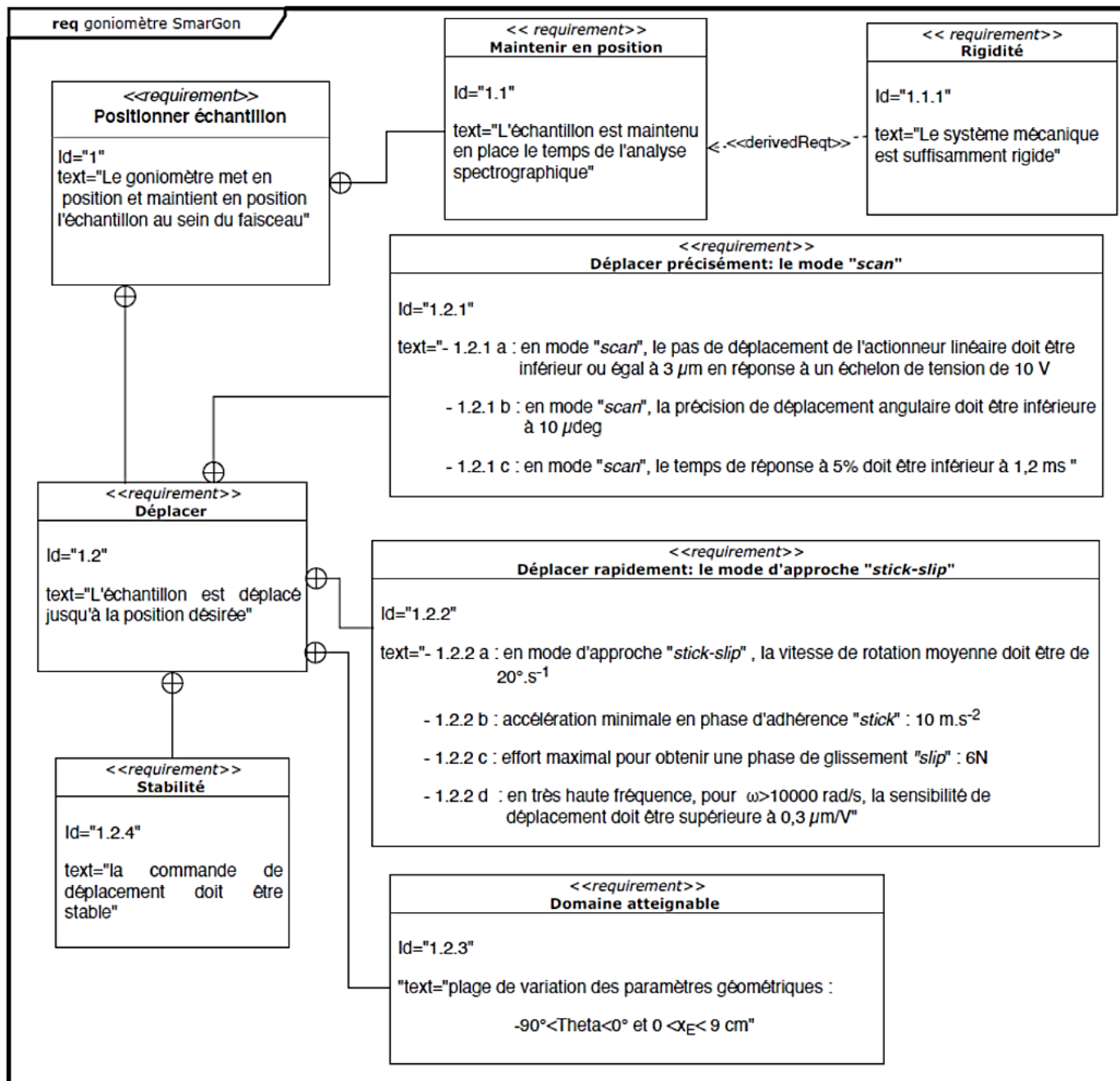
Figure 14 : position de l'organe terminal en mode « scan » en fonction du temps (ms)

Question 30. Indiquer sur le document-réponse la valeur finale ainsi que le temps de réponse à 5%, en faisant apparaître les tracés nécessaires sur la courbe. Conclure sur les exigences 1.2.1 b et 1.2.1 c du mode « scan » du cahier des charges.

Conclusion : les performances simulées du système de positionnement du goniomètre sont validées.

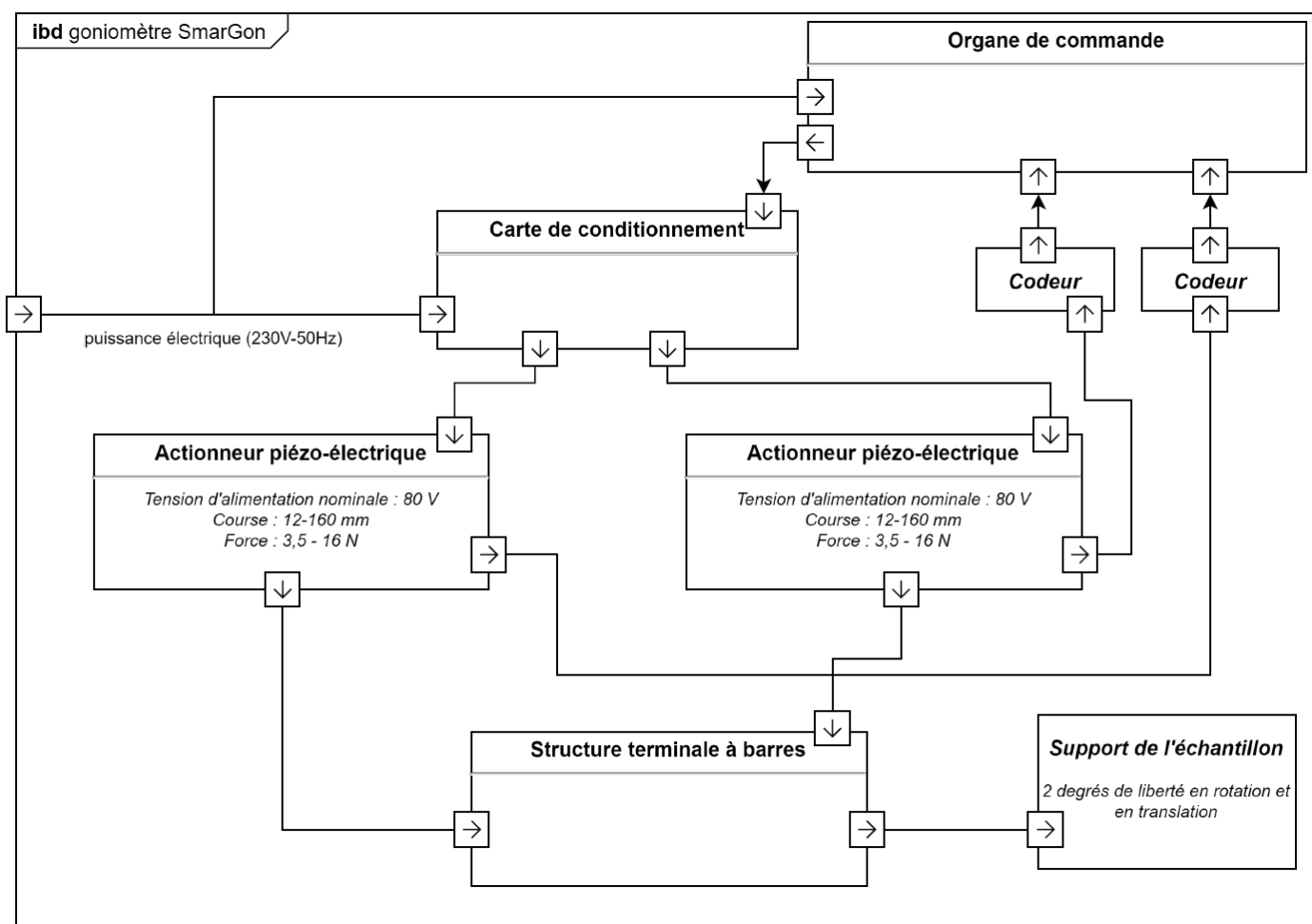
ANNEXE 1

Diagramme des exigences (req)



ANNEXE 2

Diagramme de blocs internes (ibd)



ANNEXE 3

Caractéristiques mécaniques des actionneurs piézoélectriques disponibles

Référence	Course	Force	Dimensions de la section transversale de l'actionneur
	[mm]	[N]	[mm]
SLC 17	12	3,5	17x8,5
SLC 24	54	5,5	24x10,5
CLS 32	102	7	32x11
CLS 52	123	10,5	52x14
CLS 92	160	16	92x17

Exercice : Roue Ez-wheel (inspiré de CCImp MP 2014)

I. La roue autonome

Ez-Wheel SAS est une entreprise française de technologie innovante fondée en 2009. Elle propose une gamme de roues électriques "clé en main", 100% intégrées. La roue autonome ez-Wheel (prononcer "easy- wheel") propose une solution simple pour tracter des équipements de manutention et de transport de charges, des véhicules légers et matériels médicaux (figure1). Le stator de la roue ez-Wheel est fixé sur le châssis de l'engin à déplacer et son rotor est assemblé directement sur sa roue.

La solution intègre, au sein d'une roue, tous les composants nécessaires à la traction : la motorisation électrique, des batteries haute énergie de très longue durée de vie, un contrôleur de puissance assurant un pilotage optimal et la gestion de la batterie ainsi qu'une interface de commande sans fil. La transmission de l'énergie est réalisée par un variateur (incorporé à la carte de commande), un moteur brushless, puis un réducteur (figure1).

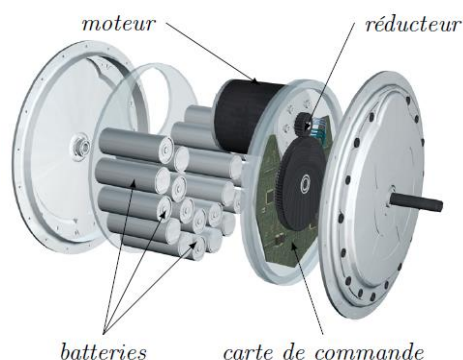


Figure 1 : Principaux éléments d'une roue ez-Wheel



Figure 2 : Prototype de fauteuil roulant équipé de deux ez-Wheel

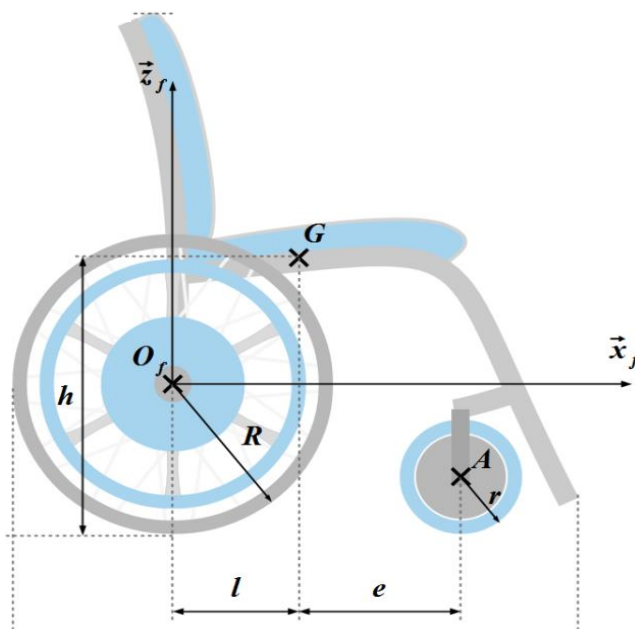
II. Etude du franchissement d'un obstacle

Le stator de la roue Ez-Wheel est fixé sur le châssis de l'engin et son rotor est assemblé directement sur la roue de l'engin.

Nous allons étudier cette roue autonome montée sur un fauteuil roulant. La figure ci-dessous modélise la géométrie du fauteuil :

$$h = 800 \text{ mm} \quad l = 200 \text{ mm} \quad e = 400 \text{ mm}$$

$$R = 400 \text{ mm} \quad r = 150 \text{ mm}$$



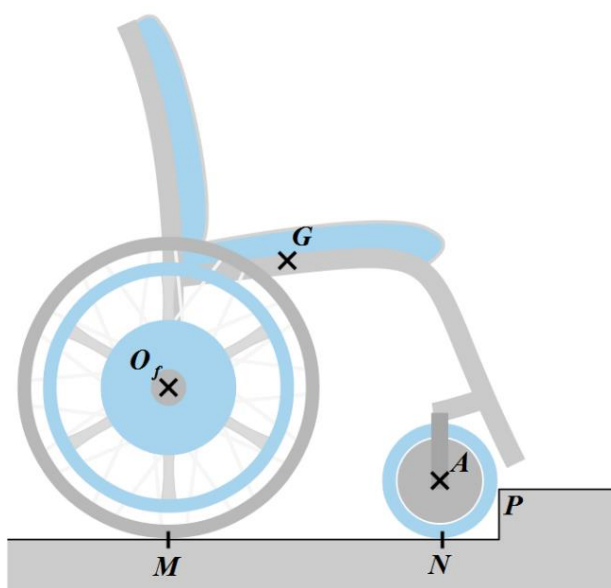
Lors de ses déplacements en extérieur, la personne sera amenée à franchir différents obstacles, notamment des bordures au niveau des passages piétons. Même si de nombreuses communes adoptent de plus en plus de passages abaissés pour faciliter le passage des fauteuils roulants, de nombreux passages restent encore réalisés avec des bordures classiques qui ont une hauteur d'environ 10 cm par rapport au niveau de la route.

La figure ci-contre représente le fauteuil en position de franchissement d'obstacle.

Les hypothèses d'étude de cette partie sont :

- le problème est plan ce qui revient à prendre en compte une seule roue avant et une seule roue arrière ;
- la roue avant est **décollée du sol (pas de contact en N)** et sont en contact avec le trottoir en P avec :

$$\vec{NP} = r' \vec{x}_f + d \vec{z}_f \quad d = 100 \text{ mm et } r' = \sqrt{r^2 - (r - d)^2} \approx 141 \text{ mm}$$
- les liaisons entre le sol et les roues en M et P sont modélisées par des liaisons sphère-plan avec frottement ;
- les frottements en M et P sont caractérisés par un coefficient de frottement constant $f = 0,8$;
- l'ensemble étudié $S = \{\text{Fauteuil motorisé} + \text{Utilisateur}\}$ a une masse notée $M = 150 \text{ kg}$;
- la roue arrière est en liaison pivot d'axe (O_f, \vec{y}_f) par rapport au châssis du fauteuil ;
- la roue avant est en liaison pivot d'axe (A, \vec{y}_f) par rapport au châssis du fauteuil ;
- les liaisons autres que les liaisons roue/sol sont considérées comme étant parfaites ;
- étant donné les faibles accélérations lors de cette phase de franchissement, une étude statique sera menée.



- Q1.** Sur le document réponses, représenter toutes les actions mécaniques qui s'exercent sur S par des vecteurs. Quel est le nombre d'inconnues, peut-on résoudre en isolant seulement le fauteuil ?
- Q2.** Donner une représentation du B.A.M.E. sur la roue avant (sur la figure du document réponses). En isolant la roue avant, écrire l'équation du PFS qui relie les composantes de l'action en P et les paramètres géométriques. Quelle interprétation graphique donnez-vous à cette équation ?
- Q3.** En isolant S , écrire les deux équations du théorème de la résultante statique. En utilisant l'équation de la question précédente, donner une équation reliant les actions mécaniques en M, le poids et les paramètres géométriques.
- Q4.** En isolant S , écrire l'équation du PFS qui relie les composantes de l'action en M, le poids et les paramètres géométriques.
- Q5.** A partir des deux équations des deux questions précédentes, montrer que le franchissement de l'obstacle est possible.
- Q6.** Donner numériquement le couple moteur transmis à une roue, permettant de franchir l'obstacle. Expliciter la démarche.